

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.01.07

基于星间链路的 BDS 导航系统 实时星历和钟差分离修正

曹月玲^{1,2}, 胡小工¹, 周善石¹, 刘 利³, 吴晓莉³,
苏冉冉³, 常志巧^{1,2}, 何 峰³, 吴 斌¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京环球信息应用开
发中心, 北京 100094)

摘要: BDS 导航系统授权服务通过提供实时广域差分改正, 满足高精度导航用户的导航需求。研究独立时间同步支持下的 BDS 卫星导航系统的广域差分修正模型与方法, 比较了星历和星钟误差的一维(即 ICD 文件中的等效钟差)和四维差分等两种模式的修正性能, 利用 *DOP* 值分析了星历改正的误差传播规律。分析表明, 一维差分模式的修正精度随轨道误差增加而降低, 不适用于在轨卫星故障及 GEO 卫星轨道机动后轨道快速恢复等情况, 并且会降低广域差分系统的可用性; 而仅在星地观测条件下, 广域差分的三维星历和钟差分离的四维差分模式稳定性较差, 区域监测网分布严重限制了星历和钟差误差的分离精度。随着 BDS 全球系统发展, 为满足星座自主导航的需求, 系统将提供星间链路观测。通过建立仿真平台, 对星间链路支持下的星历和星钟误差分离方法进行研究与分析, 结果得出, 增加星间链路观测, 可以有效地分离星历和星钟误差, 将星历误差传播放大因子降低约 50%; 与一维差分模型相比, 将监测站布站稀疏区域内的用户差分改正精度提高约 60%。

关键词: 等效钟差; 轨道和钟差分离; 星间链路; 几何精度因子; 用户差分距离精度

中图分类号: P173 **文献标识码:** A

1 引 言

随着卫星导航技术在国民经济和国防军事等领域的应用日益广泛和深入, 全球卫星导航系统 (GNSS) 已经成为影响国家安全和经济利益的战略“要点”, 因此我国积极推进实施自主研发、独立运行的北斗卫星导航系统 (BDS) 建设。经过十多年的努力, BDS 已经成为全球

收稿日期: 2014-05-27; 修回日期: 2014-06-03

资助项目: 国家自然科学基金 (11203059, 41204023); 国家测绘地理信息局测绘基础研究基金 (13-01-07); 上海市空间导航与定位技术重点实验室基金 (14DZ2276100)

通讯作者: 胡小工, hxg@shao.ac.cn

四大卫星导航系统之一, 于 2013 年提供亚太地区区域服务, 并计划于 2020 年左右实现全球导航定位服务。

充分考虑与其他 GNSS 系统的兼容互操作及现有 GNSS 系统存在的不足, BDS 在设计上有很多独特之处, 同时提供开放服务和授权服务两种方式^[1]。文献 [2] 详细列出了开放服务与授权服务的差异, 以及授权服务采用的差分改正模型。授权服务通过为授权用户实时提供广域差分改正和完好性信息, 满足高精度、高可靠性卫星导航用户的需求。

为有利于重点区域服务, BDS 采用了地球静止轨道 (GEO) 和倾斜地球同步轨道 (IGSO), 联合中高轨 (MEO) 的混合星座设计。但 GEO 卫星几何位置相对静止、卫星轨道和卫星钟差解算高度相关, 不利于卫星精密轨道确定; 受区域监测网局限, MEO 卫星监测弧段短, 对卫星高精度定轨带来挑战。这些因素均会影响广播星历的精度, 通过实时提供星历和钟差的差分改正信息, 可以有效提高系统的服务精度。因此, 优化星历和钟差差分改正模型, 对 BDS 广域差分系统有重要意义。

在 BDS 发布的接口 ICD (Interface Control Document) 文件中指出, 鉴于监测网局限, 区域导航广域差分系统采用一维的等效钟差, 统一修正星历和钟差误差^[2]。文献 [2, 3] 显示, 等效钟差对于健康卫星的星历误差修正是有效的, 但是对星历误差的修正能力有限, 不能满足卫星轨道机动、卫星故障后轨道快速恢复的需求。在 GPS 增强系统 WAAS (Wide Area Augmentation System) 系统中, 分别提供星历误差和钟差误差差分改正, 采用基于站间单差的运动学模型动态处理^[4], 实时分离解算星历误差和星钟误差; 但这种算法对数据质量非常敏感, 易引起误差估计的不精确性。本文利用 BDS 特有的双向时间同步体制, 将广播星历中的星历和星钟误差进行分离, 结果显示, 星历误差解算精度仍然受到观测几何的制约。

星间链路技术是新一代 GNSS 实现卫星自主运行的关键技术之一。随着 BDS 全球系统的发展, 国内正积极开展对导航星座星间链路的设计和论证研究。因为星间链路观测可以有效地改善区域监测网的几何局限, 降低误差传播因子, 本文主要研究星间链路支持下的广域差分修正模型, 通过建立仿真平台, 对星间链路观测条件下广域差分修正性能进行了验证。

2 广域差分改正模型及性能分析

2.1 一维差分模型

设测站 i 在某一时刻观测卫星 j 得到的伪距观测方程为:

$$P_i^j = |X^{\text{sat}} - X_{\text{rcv}}| + c(\Delta t_i - \Delta t^j) + \varepsilon_{\text{orb}} + \varepsilon_{\text{satclk}} + \Delta t_{\text{Iono}} + \Delta t_{\text{Trop}} + \Delta t_{\text{cor}} + \varepsilon_i^j \quad (1)$$

式中, P_i^j 是伪距观测值, X^{sat} 和 X_{rcv} 分别为卫星位置矢量和监测接收机坐标, Δt_i 和 Δt^j 分别为接收机、卫星钟差, ε_{orb} 和 $\varepsilon_{\text{satclk}}$ 为星历误差和卫星钟差误差在用户视线方向的投影, Δt_{Iono} 和 Δt_{Trop} 分别为电离层延迟和对流层延迟, Δt_{cor} 为可通过模型计算的系统公共时延, ε_i^j 为多路径误差和噪声。在式 (1) 中, 监测接收机坐标已经精确测定, 卫星位置与卫星钟差信息从广播星历中获取, 电离层延迟、对流层延迟及其他系统时延通过模型进行修正。

当轨道误差较小时,可以忽略轨道误差在区域内不同测站方向上的投影差异,以等效钟差的形式,将星历和星钟误差进行统一修正,即:

$$pcor^j = -(\varepsilon_{orb} + \varepsilon_{satclk}) \quad , \quad (2)$$

$pcor^j$ 为卫星 j 的等效钟差修正。

2.2 星历误差投影特性

由式 (2) 可知,等效钟差改正修正的是卫星钟差误差和卫星星历误差在各监测站方向投影的平均值。

假设星历中存在误差 (dR, dT, dN), 则星历误差在测站 i 视线方向的投影误差为: $\varepsilon_{orb} = a_i \cdot dR + b_i \cdot dT + c_i \cdot dN$, 其中, (a_i, b_i, c_i) 为星历误差在该测站方向的投影系数, 计算方法见文献 [5,10]。

由于 GEO 位置相对静止, 分别选择最西边的 G5 ($60^\circ E$) 和最东边的 G4 ($160^\circ E$) 两颗卫星, 比较四方位上不同测站的投影系数差异。图 1 中给出 R, T, N 三个方向的星历误差投影系数, 其中不同颜色曲线代表不同监测站投影系数。星历误差对不同测站投影系数的最大差异以及分布方向的统计见表 1。

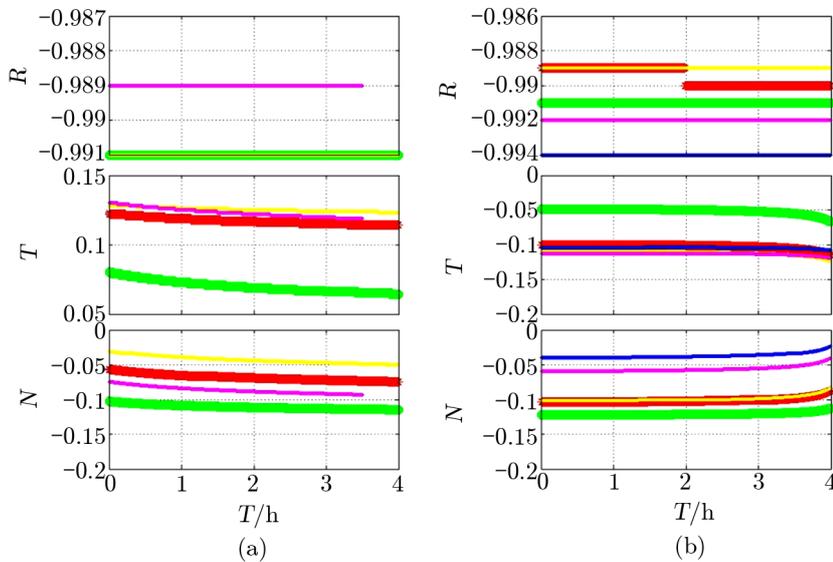


图 1 不同测站轨道误差投影系数

(a) GEO4; (b) GEO5。红色曲线代表测站 01, 绿色曲线代表测站 02, 蓝色曲线代表测站 03, 黄色曲线代表测站 04, 紫色曲线代表测站 05。

上述分析表明, 当 T, N 方向的轨道误差达到百米量级时, 轨道误差在不同监测站的投影差异就达到米级。因此, 在卫星轨道机动、卫星故障后轨道快速恢复、IGSO 卫星动偏转零偏等特殊状态下, 卫星轨道预报误差可至几千米, 等效钟差忽略轨道误差投影特异性, 会严重降低广域差分的服务精度。

表 1 星历误差在不同测站方向的投影系数的差别统计

| 星历误差方向 | GEO 4 | | GEO 5 | |
|----------|-------|--------|-------|--------|
| | 最大差值 | 最大差异方向 | 最大差值 | 最大差异方向 |
| <i>R</i> | 0.002 | 东西方向 | 0.005 | 东西方向 |
| <i>T</i> | 0.050 | 南北方向 | 0.060 | 南北方向 |
| <i>N</i> | 0.070 | 南北方向 | 0.080 | 东西方向 |

2.3 星历和星钟误差分离模型

为了进一步提高对星历误差的修正能力, 满足卫星轨道机动、卫星故障后轨道快速恢复的需求, 改善差分系统的可用性与连续性, 研究将轨道误差和钟差误差进行分离的方法。

由于测站钟差、卫星钟差误差与星历径向误差强相关, 同时求解星历误差与钟差误差会导致法方程严重病态, 影响误差分离结果的准确性。WAAS 系统中基于站间单差处理, 分离星历和钟差误差, 为了降低观测几何的影响, 需要引入先验信息, 算法处理复杂。本文利用 BDS 独立时间同步观测, 先计算卫星钟差改正, 将星历和钟差误差解耦, 再计算三维轨道误差。采用测站共视同步法, 消除伪距残差中的测站钟差, 算法处理流程见图 2。

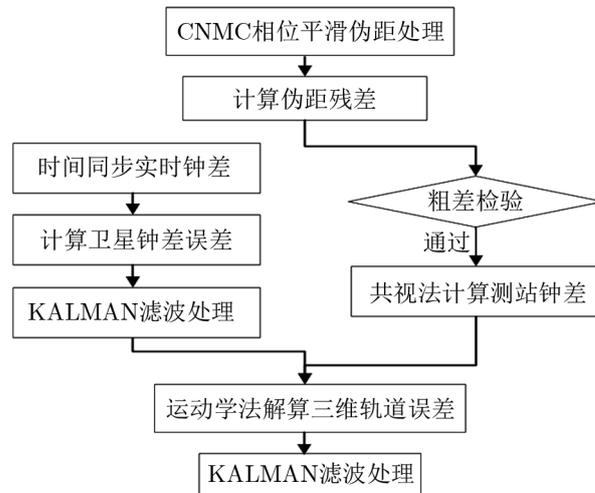


图 2 星历和钟差分离算法处理流程

建立地-星-地时间比对链路, 可以获得星地相对钟差。利用北斗特有的星地双向时间同步观测数据^[6], 实时计算卫星钟差:

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{AS} = & \frac{1}{2}(R_A - R_S) + \frac{1}{2}[(\tau_A^T + \tau_S^R) - (\tau_S^T + \tau_A^R)] + \frac{1}{2}(\tau_{AS}^{ion} - \tau_{SA}^{ion}) + \\
 & \frac{1}{2}(\tau_{AS}^{tro} - \tau_{SA}^{tro}) + \frac{1}{2}(\tau_{AS}^G - \tau_{SA}^G) + \frac{1}{2}(\tau_{AS} - \tau_{SA}) \quad , \quad (3)
 \end{aligned}$$

式中, ΔT_{AS} 为实时卫星钟差结果, R_A 和 R_B 为星地双向时间同步观测值, τ_A^T 、 τ_S^T 分别为地面站和卫星的发射设备时延, τ_A^R 、 τ_S^R 分别为地面站和卫星的接收设备时延, τ_{AS}^{ion} 、 τ_{SA}^{ion} 分别

为星地双向电离层时延, τ_{AS}^{tro} 、 τ_{SA}^{tro} 分别为星地双向对流层时延, τ_{AS}^G 、 τ_{SA}^G 分别为星地双向引力时延, τ_{AS} 、 τ_{SA} 分别为双向信号由于观测目标运动引起的时延。

时间同步实时钟差处理精度可达 $1 \text{ ns}^{[3,7]}$, 将时间同步实时钟差进行 kalman 滤波处理^[4], 与广播星历钟差比较, 得到卫星的钟差误差 $\varepsilon_{\text{satclk}}$ 。

采用共视法处理监测站钟差, 如某历元某监测站观测了 n 个卫星, 则该历元该接收机钟差为:

$$Clk_{\text{sta}} = \frac{\sum_n (\rho^{(O)} - \rho^{(C)})}{n} . \quad (4)$$

利用单历元几何法建立轨道监测方程, 确定三维空间信号误差。轨道误差监测方法为: 利用广播星历和卫星钟差计算监测站到卫星的理论值为 $\rho^{(C)}$; 对相位平滑伪距进行实时卫星钟差改正、接收机钟差改正、大气延迟误差改正以及其余各项公共误差改正后得到距离观测值 $\rho^{(O)}$ 。设某历元卫星星历误差为 $(dx_j^i \ dy_j^i \ dz_j^i)$, 则可以建立伪距观测方程:

$$\rho_j^{i(O)} - \rho_j^{i(C)} = \mathbf{A} \cdot \begin{pmatrix} dx_j^i \\ dy_j^i \\ dz_j^i \end{pmatrix} = \mathbf{A}_{RTN} \cdot \begin{pmatrix} dR_i \\ dT_i \\ dN_i \end{pmatrix} , \quad (5)$$

\mathbf{A} 矩阵为 i 卫星星历在测站 j 视线方向上的投影系数。利用单历元多站多星观测数据, 计算各卫星的星历改正误差。

2.4 星历误差的误差放大因子分析

对钟差误差的监测精度主要受时间同步双向测距精度影响, 目前时间同步钟差测量精度优于 $1 \text{ ns}^{[5]}$ 。

文献 [2] 表明, 目前 BDS 中对用户测距误差影响的主要因素是轨道误差, 因此重点分析轨道误差的分离精度。倒几何精度衰减因子 DOP 值反映了对轨道误差监测的几何构形, 通过对三维方向 DOP 值进行分析, 可以得到传播路径误差对轨道误差解算精度的影响。

观测方程 (5) 的信息矩阵为 $\mathbf{Q}_{RTNi} = (\mathbf{A}_{RTNi}^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_{RTNi})^{-1}$, 则

$$RDOP_i = \sqrt{Q_{RTNi1,1}} , \quad TDOP_i = \sqrt{Q_{RTNi2,2}} , \quad NDOP_i = \sqrt{Q_{RTNi3,3}} . \quad (6)$$

采用 10 个监测站数据计算星历和星钟误差改正, 利用 BDS 实测数据, 对星历误差改正的误差传播规律进行了分析计算, 统计结果见表 2。

从表 2 的结果可以看出, 仅利用星地链路观测数据, 卫星星历改正的三维误差放大效应约为 34。其中, R 方向平均误差放大因子约为 4.3, T 方向平均误差放大因子约为 26.6, N 方向平均误差放大因子约为 19.5。

3 星间及星地链路仿真平台

星间链路技术是新一代 GNSS 系统建设的关键技术之一, 并且星间链路观测可以有效地改善区域监测网的几何局限。针对未来的 BDS 全球导航系统, 建立仿真平台, 仿真卫星轨

表 2 误差传播因子统计结果

| SatID | RDOP | TDOP | NDOP | PDOP | SatID | RDOP | TDOP | NDOP | PDOP |
|-------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| GEO1 | 2.2 | 17.3 | 15.2 | 23.1 | IGSO6 | 4.2 | 31.2 | 17.9 | 36.2 |
| GEO3 | 2.1 | 18.2 | 11.8 | 21.8 | IGSO7 | 4.1 | 30.5 | 18.0 | 35.6 |
| GEO4 | 6.9 | 38.4 | 36.7 | 53.6 | IGSO8 | 4.0 | 29.4 | 16.8 | 34.1 |
| GEO5 | 4.2 | 28.0 | 19.6 | 34.5 | IGSO9 | 4.2 | 30.8 | 17.0 | 35.4 |
| MEO11 | 7.5 | 22.3 | 29.3 | 37.6 | IGSO10 | 3.8 | 28.4 | 16.4 | 33.0 |
| MEO12 | 4.6 | 18.3 | 16.1 | 24.8 | Mean | 4.3 | 26.6 | 19.5 | 33.6 |

道、星间链路和星地链路观测数据, 以研究星间链路支持下的星历误差分离解算精度, 并与星地链路结果进行比较分析。

仿真平台中, BDS 全球系统的仿真星座为 (24MEO+3GEO+3IGSO), 图 3 为仿真系统的卫星星下点轨迹。

仿真平台中, 采用 cowell 多步数值积分方法积分了两条卫星轨道。两条轨道的初轨位置互差为分米级随机误差, 速度无差异。利用一条轨道作为仿真的卫星实际轨道, 仿真观测数据; 利用另一条轨道作为广播星历。卫星轨道数值积分力学模型包括: 太阳、月球和各大行星的三体摄动、地球引力场非球形摄动、太阳光压摄动、固体潮、海潮和大气潮汐摄动。

对于星间链路的仿真数据, MEO 卫星的星间拓扑关系为: 同轨道面建立两条, 异轨道面建立一条固定连接的星间链路。MEO 与 IGSO 卫星和 GEO 卫星在张角 20° 和 50° 范围内全部可视卫星间建立星间链路拓扑。每颗 MEO 卫星有 3 条固定链路, 与高轨 IGSO 和 GEO 卫星的可视链路为 0—5 条。考虑地缘政治因素, 对于星地观测数据, 仅仿真局域监测网下的相位平滑伪距观测数据。其中仿真的区域监测站分布如图 4 所示。图 5 和图 6 给出了星地链路和星间链路观测数据的仿真流程与方法。

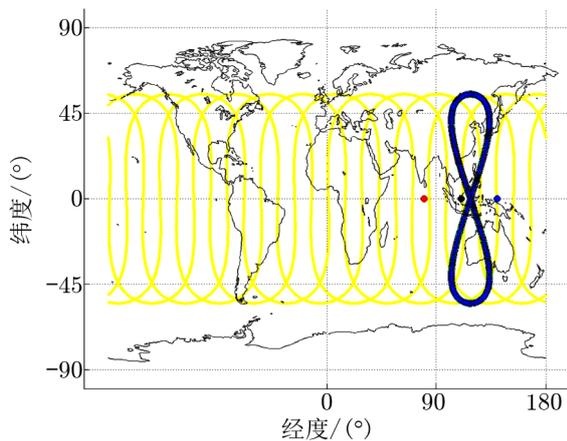


图 3 仿真 BDS 全球系统的卫星星下点轨迹

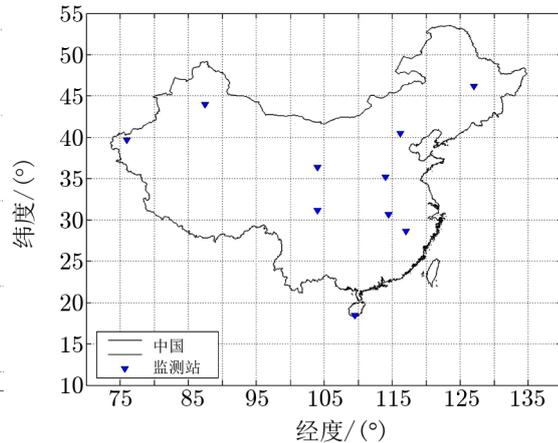


图 4 仿真平台中国区域监测站分布

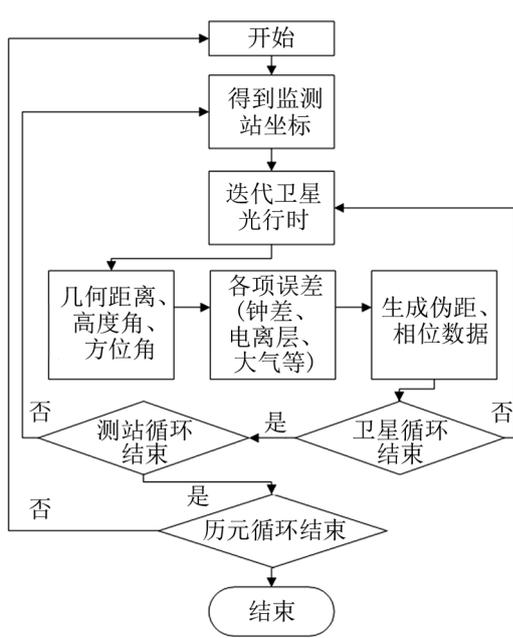


图 5 星地链路观测量模拟流程图

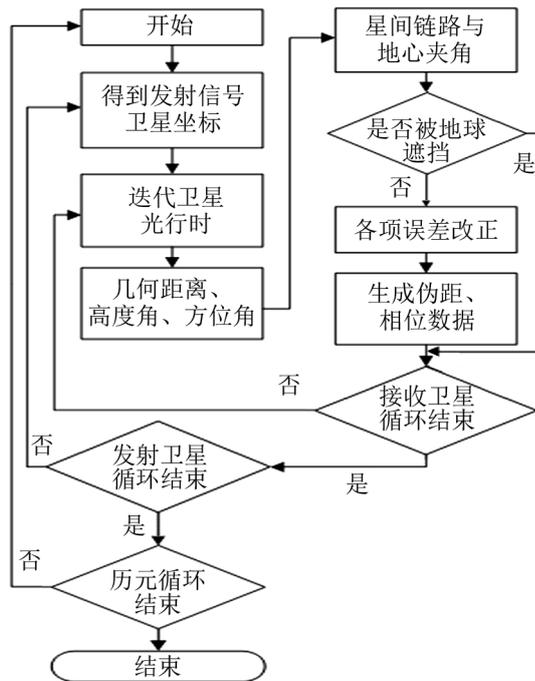


图 6 星间链路观测量模拟流程

星间链路观测数据的测距误差为 0.002 m 的随机误差，星地链路仿真相位平滑伪距，处理方法见文献 [8]，观测数据的测距误差为 0.01 m 的随机误差。

4 试验分析及有效性验证

导航系统定位服务精度可以通过两个指标描述：精度衰减强度因子 DOP 和用户等效距离误差 URE ^[9]。精度近似 = $DOP \times URE$ 。经过差分改正后的用户等效距离误差即为用户差分距离误差 $UDRE$ 。

4.1 DOP 和参数相关性分析

分别针对 MEO、IGSO 和 GEO 三类卫星，对 R 、 T 、 N 三个轨道方向的倒几何精度因子和三个方向星历误差相关性进行分析。与仅利用星地链路结果比较，分析星间链路增强对误差传播因子及参数计算相关性的影响。对 24 h 结果统计的均方根 RMS 见表 3。其中 $RMS = \sqrt{mean^2 + std^2}$ ， $mean$ 表示均值， std 表示方差。

从表 3 的结果可以看出，仅利用区域监测网星地链路观测数据，受到观测几何局限，三维位置的传播路径误差将被放大约 20 倍，轨道改正计算精度受观测误差的影响较大。

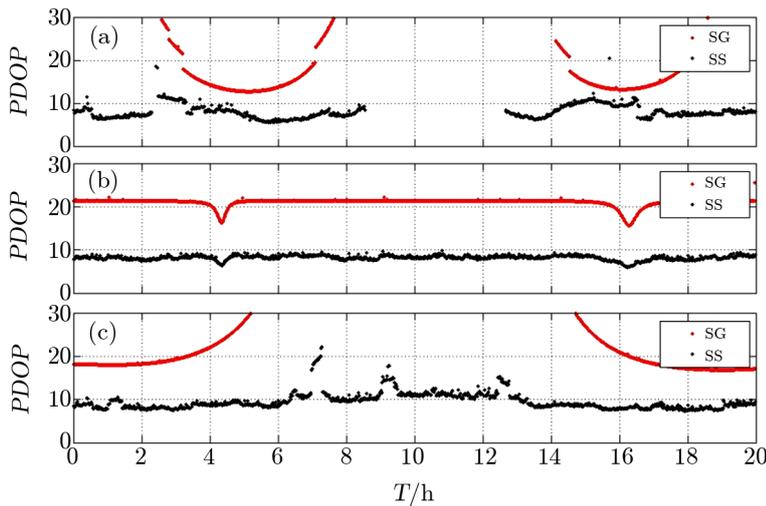
增加星间链路后，MEO、IGSO 和 GEO 三类卫星的误差传播因子降低了约 50%。与此同时， R 与 T 方向星历改正计算相关性降低约 10%， R 与 N 方向星历改正计算相关性降低

表 3 误差传播因子统计结果

| 卫星号 | | DOP | | | | 参数相关性 (COV) | | |
|---------|---------|-------|--------|--------|--------|-------------|-------|-------|
| | | RDOP | TDOP | NDOP | PDOP | R/T | R/N | T/N |
| MEO-06 | 星地 | 2.456 | 14.094 | 9.911 | 17.404 | 0.796 | 0.725 | 0.355 |
| | 星间/星间联合 | 1.248 | 5.317 | 6.076 | 8.169 | 0.702 | 0.630 | 0.354 |
| MEO-10 | 星地 | 1.946 | 11.860 | 9.483 | 15.308 | 0.842 | 0.504 | 0.273 |
| | 星间/星间联合 | 2.282 | 5.994 | 5.478 | 8.434 | 0.640 | 0.432 | 0.249 |
| IGSO-28 | 星地 | 1.536 | 15.776 | 12.438 | 20.148 | 0.723 | 0.655 | 0.313 |
| | 星间/星间联合 | 1.195 | 7.341 | 6.322 | 9.761 | 0.701 | 0.464 | 0.230 |
| IGSO-30 | 星地 | 1.205 | 14.189 | 12.475 | 18.931 | 0.655 | 0.695 | 0.267 |
| | 星间/星间联合 | 1.150 | 7.026 | 6.337 | 9.531 | 0.616 | 0.509 | 0.222 |
| IGSO-25 | 星地 | 2.364 | 19.452 | 12.296 | 23.133 | 0.942 | 0.695 | 0.466 |
| | 星间/星间联合 | 0.880 | 7.470 | 5.353 | 9.232 | 0.840 | 0.439 | 0.146 |
| IGSO-26 | 星地 | 1.812 | 17.744 | 11.129 | 21.023 | 0.964 | 0.307 | 0.183 |
| | 星间/星间联合 | 0.722 | 6.543 | 4.953 | 8.238 | 0.884 | 0.268 | 0.132 |

约 20%, T 与 N 方向星历改正计算相关性降低约 20%。

选择 1 颗 MEO、1 颗 GEO 和 1 颗 IGSO 卫星, 比较星地链路和星地星间联合条件下各卫星的 $PDOP$ 时间序列, 如图 7 所示。图 7 (a) 是 6 号卫星, 为 MEO 卫星; (b) 是 26 号卫星, 为 GEO 卫星; (c) 是 28 号卫星, 为 IGSO 卫星。各图中, 红色曲线“SG”表示星地链路, 黑色曲线“SS”表示星地和星间联合链路。从图中可以看出, 增加星间链路, 不仅降低了误差传播因子 DOP , 还增加了 MEO 卫星和 IGSO 卫星的可监测弧段。

图 7 星地链路和星地/星间联合链路的 $PDOP$ 比较

降低 DOP 值是为了降低传播路径误差对星历改正计算结果的影响。为具体说明, 将计

算得到的卫星星历误差与仿真的卫星星历误差比较,可以得到卫星星历改正计算精度。图 8 给出 1 颗 MEO 卫星在星地链路和星地/星间联合链路下的卫星星历改正计算精度,星历改正结果主要受观测误差的影响。相同观测误差条件下,仅星地链路,对 R 方向的影响为 4 cm, T 方向影响为 18 cm, N 方向的影响为 11 cm;星地星间联合链路,对 R 方向的影响为 1 cm, T 方向影响为 4 cm, N 方向的影响为 5 cm。

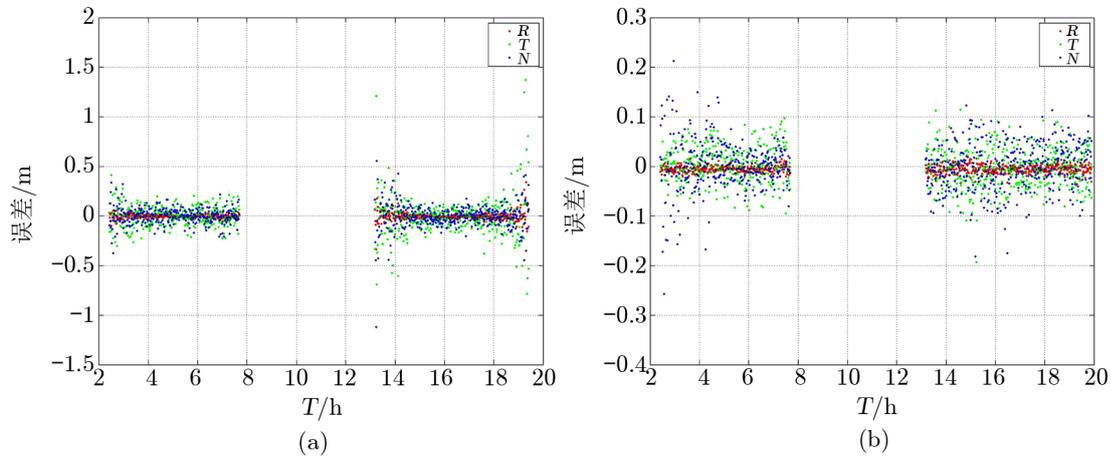


图 8 MEO 卫星轨道误差分离精度比较

(a) 星地链路; (b) 星地/星间联合。

4.2 UDRE 与 UERE 分析

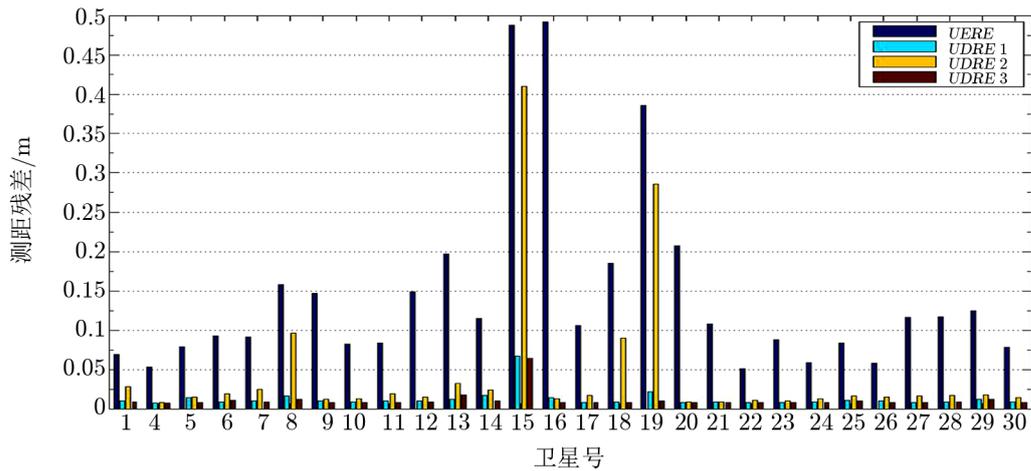
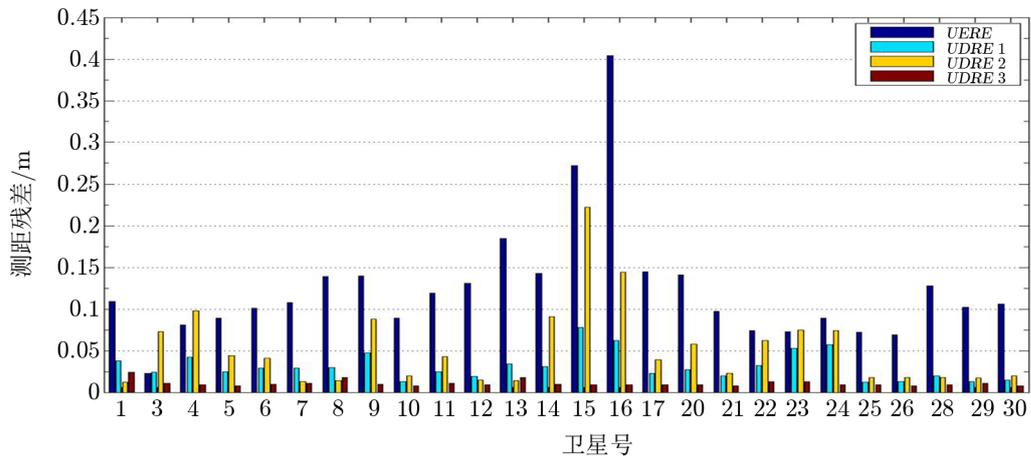
用户等效距离误差 ($UERE$) 和用户差分距离误差 ($UDRE$) 分别反映了差分改正前、后的伪距残差,可用来评估差分模型的改正精度,计算方法可参见文献 [2]。

对于卫星星钟误差改正,采用时间同步观测实时修正。对于星历误差改正,采用 3 种方案计算,并对计算结果进行比较分析。

方案 1 采用星地链路观测数据解算一维的等效钟差;方案 2 仅利用星地链路观测数据解算三维轨道误差 (dx_j^i dy_j^i dz_j^i);方案 3 利用星地和星间链路联合观测数据解算三维轨道误差 (dx_j^i dy_j^i dz_j^i)。

根据仿真的监测站分布 (见图 4),分别在监测站分布密集地区 (东部地区) 和监测站分布稀疏地区 (西部地区) 选择 2 个用户,分析 3 个差分方案的 $UDRE$,并与差分改正前 $UERE$ 进行比较。结果如图 9 和图 10 所示,图中, $UERE$ 为差分前用户距离误差; $UDRE1$ 表示方案 1 的差分距离误差; $UDRE2$ 表示方案 2 的差分距离误差; $UDRE3$ 表示方案 3 的差分距离误差。

由结果知,采用一维等效钟差修正,监测站稀疏区域的差分修正精度较低。仅利用星地链路,部分卫星由于出、入境等原因导致观测几何差,计算的三维星历改正精度低,差分改正后 $UDRE$ 比等效钟差修正的 $UDRE$ 误差大。增加星间链路增强后,采用三维星历误差修正模型,计算的 $UDRE$ 误差最小,并且各卫星的 $UDRE$ 量级相当,计算结果比较稳定。

图 9 中东部地区用户观测卫星的 $UDRE$ 与 $UERE$ 比较图 10 西部地区用户观测卫星的 $UDRE$ 与 $UERE$ 比较

5 结 论

本文基于 BDS 特有的时间同步体制, 对 BDS 广域差分中星钟和星历误差的实时差分改正方法进行了研究, 比较了一维和三维星历改正模型的算法和性能, 并分析讨论了星间链路增强对三维星历误差修正的影响。

一维等效钟差模型没有考虑轨道误差在不同方向的投影, 对轨道误差修正能力有限, 不适用与 GEO/IGSO 卫星机动后快速恢复等特殊情况。并且模型的修正精度与监测站分布有关, 在监测站分布稀疏区域修正精度下降。

三维星历误差模型受观测几何影响。利用实测数据对 DOP 值的分析结果表明, 仅利

用区域监测网解算三维星历误差 (dx_j^i dy_j^i dz_j^i), 星历改正精度受观测误差影响较大, 其中 T 、 N 方向的误差放大倍数约为 20~30 倍, R 方向的误差放大倍数约为 4 倍。

建立仿真验证平台, 对 BDS 全球导航系统的差分改正精度进行仿真评估, 并研究了增加星间链路对三维星历误差解算的影响。结果显示, 星间链路能够有效提高 MEO、IGSO 和 GEO 卫星的三维星历误差解算精度, 将误差传播因子降低约 50%。与此同时, 将 R 与 T 方向星历改正计算相关性降低约 10%, R 与 N 方向星历改正计算相关性降低约 20%, T 与 N 方向星历改正计算相关性降低约 20%。

增加星间链路后, 采用三维星历误差修正与采用等效钟差模型相比, 在监测站稀疏的西部地区, 用户的 $UDRE$ 精度提高约 60%。

参考文献:

- [1] www.beidou.gov.cn, 2014
- [2] Cao Y L, Hu X G, et al. Sci China Phys Mech Astron, 2012, 55: 1307
- [3] Zhou S S, Cao Y L, et al. Sci China Phys Mech Astron, 2012, 55: 2290
- [4] Yeou-Jyh Tsai. Dissertation. Stanford: Stanford University, 1999: 175
- [5] 周忠谟, 易杰军, 周琪. GPS 卫星测量原理与应用 (修订版). 北京: 测绘出版社, 2004: 97
- [6] 刘利, 韩春好. 天文学报, 2004, 22(3): 219
- [7] Zhou S S, Hu X G, Wu B, et al. Sci China Phys Mech Astron, 2011, 54: 1089
- [8] Karl S, Zeta AI, Peter S, et al. ION GPS 2001. Utah: ION, 2001: 2334
- [9] Jiao W H, Ding Q, Li J W, et al. Sci China Phys Mech Astron, 2011, 41: 521
- [10] Cai C L, Li X H, Wu H T. Sci China Ser G-Phys Mech Astron, 2009, 52: 310

The Method for Real-time Wide Area Differential Corrections of BDS with Inter Satellite Links

CAO Yue-ling^{1,2}, HU Xiao-gong¹, ZHOU Shan-shi¹, LIU Li³, WU Xiao-li³,
SU Ran-ran³, CHANG Zhi-qiao³, HE Feng³, WU Bin¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Global Information Application and Development Center, Beijing 100094, China)

Abstract: Real-time wide area differential corrections ensure BDS authorized users with high-accuracy navigation service. A new method for introducing time synchronization observations for the correction estimation is introduced, the performance of two approaches with one- or four-dimensional correction parameters are compared. Results show that for

one-dimensional approach, the correction accuracy will decrease when the orbital errors are large. Therefore it is not suitable for the situations such as quickly orbit determination recovery after satellite failure or maneuver. While for four-dimensional approach, the stability and precision of ephemeris and satellite clock parameters are seriously affected by the limited regional monitoring network. Considering that the Inter satellite links will be setup to support auto-navigation for the global BDS system, the separation of orbital and satellite clock errors is discussed with inter satellite links. Simulation processing results show that the orbital errors in ephemeris may be effectively solved with inter satellite link observations, and propagation error may be reduced by 50%. Compared with one-dimensional approach, the performance of four-dimensional approach is also improved by 60% in the area lacked monitor stations.

Key words: equivalent satellite clock error; separation of orbital and clock error; inter satellite links; DOP; UDRE